

果蔬酚酸的研究及在保鲜中应用进展

魏云潇, 余作龙, 韩超, 金建昌, 付长春, 刘彩琴, 王楠, 王石磊 (浙江树人大学生物与环境工程学院, 浙江杭州 310015)

摘要 酚酸作为一种次生代谢产物, 参与植物抗逆应答及生理生化各项进程, 并作为抗氧化剂应用于生产。综述了果蔬体内源酚酸的存在形式、种类和分布情况, 及外源酚酸在果蔬保鲜的应用进展情况, 为深入开展果蔬品质和保鲜、加工、营养方面的研究奠定基础。

关键词 酚酸; 果蔬; 保鲜; 内源; 外源; 存在形式; 种类; 分布情况

中图分类号 TS 255 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)07-0022-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.07.007



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress of Phenolic Acids in Fruit and Vegetable and Its Application in Fresh Preservation

WEI Yun-xiao, YU Zuo-long, HAN Chao et al (College of Biology and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou, Zhejiang 310015)

Abstract Phenolic acids participate in plant as secondary metabolism and product responses to stress resistance, physiological and biochemical properties, which were applied in the production. The article introduced the forms, species and distributions of endogenous and exogenous phenolic acid in shelf-life extension of fruits and vegetables in recent years, and the prospect of further studies was also discussed briefly. This study will provide a theoretical basis for the processing- preserving and nutrition of fruits and vegetables.

Key words Phenolic acids; Fruits and vegetables; Preservation; Endogenous; Exogenous; Existing form; Species; Distribution

酚酸是一类具有酚羟基取代的芳香胺酸, 多为对羟基苯甲酸和对羟基肉桂酸的衍生物, 广泛存在植物源食品的根、茎、叶、花、种子(果实)中, 在植物种子发育^[1]、发芽^[2-3]、木质化^[4]、开花果实发育^[5]及成熟^[6]等生理生化方面起着非常重要的作用。

植物体内酚酸种类繁多, 多具有极强的自由基清除能力及抗氧化功能, 可延缓机体衰老、预防心血管疾病, 具有抗炎、防癌、抗肿瘤、抗溃疡等生理功效, 对许多重大疾病具有独特疗效, 在医疗保健方面具有不可替代的作用。此外, 酚酸作为抗氧化剂、抗菌剂、营养剂广泛应用于人类生产生活中。果蔬作为人们日常摄入酚酸的重要来源之一, 为使人们对酚酸有一个全面、系统的了解, 笔者拟从果蔬内源酚酸的存在形态、种类、分布及外源酚酸保鲜应用方面进行综述。

1 果蔬内源酚酸分布情况

1.1 形态 酚酸在植物中主要以游离态和结合态存在, 结合态酚酸主要通过酯、醚或者乙缩醛连接。各植物组织中, 酚酸只有少部分以游离态的形式存在, 多数以与纤维素、蛋白、木质素、类黄酮、葡萄糖、酒石酸结合的形式存在于植物组织的初生壁和次生壁中。目前研究发现, 植物中酚酸的种类、数量和形式影响着蔬菜品质及人体健康。

大多数蔬菜中酚酸是可溶游离型酚酸, 而茎菜类蔬菜如茼蒿、茭白、竹笋等蔬菜中则含有大量不溶性酚酸^[7]。紫甘蓝中可溶性酚酸最高, 约 121.42 μg/g, 莲藕中可溶性酚酸最低, 约 0.82 μg/g; 紫甘蓝中不溶性酚酸含量也很高, 为 31.31 μg/g, 冬瓜中不溶性酚酸最低, 约 0.01 μg/g。

水果中几乎所有酚酸($P < 0.020$)都是游离态水溶性, 其中结合态不溶性酚酸也可通过水解转变为可溶性^[8]。杨梅

汁中游离酚酸含量高于结合态酯合酚酸^[9], 南丰蜜桔幼果中可溶性酚酸含量也远远大于结合态酚酸的含量^[10]。枣核和枣皮中的酚酸主要以甲醇不溶性态形式存在, 而枣肉中则主要以糖苷键结合态形式存在^[11]。苹果中香豆素、原儿茶醛、4-羟基苯甲酸、香草和 t-阿魏酸以自由态存在, 所有酚酸(绿原酸除外)都以结合形式存在^[12]。富士苹果皮中除 t-阿魏酸外, 均以结合态存在, 其中阿魏酸可以作为苹果的年龄、成熟度、来源指示^[13]。甘蔗汁中酚酸主要是结合态形式, 咖啡酸、没食子酸主要以游离态存在, 阿魏酸、香豆酸主要以结合态存在, 而在蔗叶和蔗渣中, 咖啡酸、阿魏酸、香豆酸主要以结合态形式存在^[14]。而甘蔗叶、蔗渣中游离态酚酸含量最高, 蔗汁、蔗叶及蔗渣中总游离态酚酸含量分别为 317.18 mg/kg(干固体)、1 568.37 mg/kg(干基)及 1 504.57 mg/kg(干基); 总结态酚酸含量分别为 740.32 mg/kg(干固体)、2 725.41 mg/kg(干基)和 2 452.13 mg/kg(干基)。

1.2 种类 按其碳骨架结构的不同, 酚酸可分为羟基苯甲酸类 C_6-C_1 型(hydrobenzoic)和羟基肉桂酸类 C_6-C_3 型(肉桂酸型酚酸)。羟基苯甲酸类包括没食子酸、对羟基苯甲酸、3,4-二羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸; 羟基肉桂酸类包括咖啡酸、阿魏酸、对香豆酸、芥子酸。

目前研究发现蔬菜中羟基肉桂酸含量是羟基苯甲酸的 10 余倍, 每种蔬菜中都检测到咖啡酸和 p-香豆酸, 44 种蔬菜中检出阿魏酸和香豆酸, 43 种蔬菜检出没食子酸, 41 种蔬菜检出咖啡酸, 40 种蔬菜检出对羟基苯甲酸, 24 种蔬菜中检出 3,5-二羟基苯甲酸、2-羟基肉桂酸和 3-羟基肉桂酸 3 种酚酸^[7]。目前发现蔬菜中最多检出 17 种酚酸, 分别为没食子酸(gallic acid)、3,5-二羟基苯甲酸(3,5-dihydroxybenzoic acid)、绿原酸(chlorogenic acid)、对羟基苯甲酸(p-hydroxybenzoic acid)、咖啡酸(caffeic acid)、p-香豆酸(p-coumaric acid)、芥子酸(sinapic acid)、阿魏酸(ferulic acid)、2-羟基肉桂酸(2-hydroxycinnamic acid)、水杨酸(salicylic acid)、2,3,

基金项目 浙江树人大学青年博士计划项目(2019QC21)。

作者简介 魏云潇(1982—), 女, 河南新乡人, 高级工程师, 博士, 从事食品安全研究。

收稿日期 2019-09-23

4-三羟基苯甲酸(2,3,4-trihydroxybenzoic acid)、异阿魏酸(isoferulic acid)、焦儿茶酸(pyrocatechuic acid)、香草酸(vanillic acid)、紫丁香酸(syringic acid)、3-羟基肉桂酸(3-hydroxycinnamic acid)和龙胆酸(gentisic acid),其中主要以阿魏酸、异阿魏酸和对香豆酸3种含量最高。叶菜类蔬菜中阿魏酸、异阿魏酸和p-香豆酸3种酚酸含量较多,分别为101.99~884.68、24.81~660.41和9.27~67.41 $\mu\text{g/g}$ 。莴苣中发现了咖啡酸含量最高,约为77.91 $\mu\text{g/g}$;紫甘蓝中p-香豆酸浓度最高,约671.41 g/g ;茼蒿中阿魏酸含量极高,约660.41 g/g ;青萝卜和紫甘蓝的异阿魏酸和芥子酸含量最高,分别为68和609.96 $\mu\text{g/g}$ 。彩色马铃薯的酚酸含量从高到低依次为绿原酸、原儿茶酸、咖啡酸、没食子酸、对香豆酸、阿魏酸。

苹果中绿原酸和咖啡酸的含量水平较高,此外还鉴定出没食子酸甲酯、没食子酸乙酯、羟基苯乙酸、3-(4-羟基苯基)丙酸、3-(4-羟基苯基)丙酸和苯乙酸等酚酸^[12]。甘蔗中检出没食子酸、原儿茶酸、香豆酸、阿魏酸、芥子酸、咖啡酸、香草酸、绿原酸、丁香酸、p-羟基苯甲酸共10种酚酸^[14]。杨梅汁中主要的酚酸种类为羟苯甲酸类中的没食子酸和原儿茶酸,总酚酸含量达30.05 mg/L ^[9]。南丰蜜桔中检出6种酚酸,即咖啡酸、对香豆酸、阿魏酸、芥子酸、没食子酸和对羟基苯甲酸,幼果中主要以肉桂酸型酚酸为主,苯甲酸型酚酸含量较少,阿魏酸含量最高,其次是咖啡酸^[10]。而蜜柑果实中酚酸类物质检出了阿魏酸、咖啡酸、p-香豆酸、香草酸、芥子酸、对羟基苯甲酸、原儿茶酸7种,其中前5种为主要酚酸,含量约占97%以上,特征组分为阿魏酸^[15]。Alu'datt等^[16]研究发现柑橘结合态酚酸p-香豆酸含量最高,远高于其他酚酸。柠檬中检测到8种酚酸,包括羟基苯甲酸——原儿茶酸、p-羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸,羟基肉桂酸——咖啡酸、p-香豆酸、香豆酸、阿魏酸;柠檬中酚酸最主要的是阿魏酸、p-香豆酸、丁香酸和辛酸4种;游离酚酸的含量为0~18.96 $\mu\text{g/g}$,柠檬果肉中酯化酚酸含量最高,主要是阿魏酸(13.62~54.45 $\mu\text{g/g}$)和p-香豆酸(8.06~81.42 $\mu\text{g/g}$)^[17]。

1.3 分布差异 由于其结构中有较多的酚羟基取代,酚酸结构并不稳定,容易受到水分、温度、光、酶、酸以及碱等的影响而变质。酚酸的存在形式很复杂,种类及含量受多方面因素的影响,包括物种^[18]、品种^[19]、组织部位^[20]、成熟期^[17]、种植方式^[21]、采后贮存及加工条件^[22]等。

1.3.1 品种/物种 蔬菜种类对酚酸的含量和比例有重要影响,蔬菜的不同组织中检测到酚酸水平也有显著差异。不同种类蔬菜中酚酸含量从高到低依次为花菜类(64.39 $\mu\text{g/g}$)、根菜类(56.68 $\mu\text{g/g}$)、叶菜类(53.44 $\mu\text{g/g}$)、茎菜类(48.07 $\mu\text{g/g}$)、豆类(20.83 $\mu\text{g/g}$)、果菜类蔬菜(16.92 $\mu\text{g/g}$)。叶菜类、根菜、茎菜类蔬菜检出酚酸17种,果菜类检出12~13种,花菜类检出9~10种、豆类类检出3~10种^[7]。

由于果肉组织结构的差异性,不同种类、不同品种的果实中所含酚酸物质及其形态存在较大差异。杨梅中酚酸含量较低的品种有水品种、荔枝种和粉红种等,慈溪荸荠、仙居

荸荠、仙居东魁和象山东魁4个品种杨梅汁随着成熟度的变化总酚酸含量变化显著,不同产地对于杨梅汁中酚酸分布与含量变化的影响不同,同一品种不同产地杨梅汁游离酚酸和酯合酚酸也差异较大^[9]。柠檬品种间酚酸种类及含量也存在差异较大,从尤力克黄、青柠檬、香水柠檬、小青柠4种柠檬品种中检出苯甲酸型酚酸(原儿茶酸、香草酸、丁香酸)和肉桂型酚酸(新绿原酸、绿原酸、香豆酸);青柠檬果皮中酚酸总量最高,为5356.2 mg/kg ,尤力克果皮与果肉中新绿原酸含量最高,小青柠、青柠檬和香水柠檬果皮与果肉中含量最高的是香草酸^[23]。不同品种苹果的果皮和果肉中羟基肉桂酸和对羟基苯甲酸含量都存在显著差异($P<0.05$),史密斯苹果的果皮和果肉中迷迭香酸的含量显著低于其他品种,香豆素同分异构体也存在品种间差异。粉红女士苹果果皮中原儿茶酸的含量明显高于Fuji、Golden Delicious和Granny Smith这3个品种,富士苹果果皮中没食子酸乙酯含量较高(30%),没食子酸甲酯和水杨酸在果皮和果皮之间变化不大^[12]。

1.3.2 组织部位 在各植物不同组织中,酚酸的存在形式和含量都不尽相同,在不同的发育阶段,各植物组织中酚酸的存在形式和含量也发生相应的变化。不同部位的苦菜中酚酸含量存在明显的差异,含量从高到低依次为叶、花、茎^[24]。柠檬果皮中的总酚含量显著高于果肉^[23]。蜜柑果肉中7种酚酸类物质含量均远低于果皮,果皮中酚酸含量是果肉中的4.1~14.5倍,以p-香豆酸含量差异尤为显著,蜜柑果皮中p-香豆酸含量是果肉中的13.0~14.5倍^[15]。苹果果肉中酚酸的含量显著高于苹果皮($P<0.05$),尤其是绿原酸和咖啡酸。果肉中总绿原酸含量为157.0~745.8 mg/kg ,果皮中总绿原酸含量为63.7~449.0 mg/kg ;果肉中咖啡酸含量为44.3~287.5 mg/kg ,果皮中为1.4~125.0 mg/kg ;果肉中羟脯氨酸、4-羟基苯甲酸和没食子酸乙酯含量也同样显著高于果皮($P<0.05$)。但果皮中羟基肉桂酸如香豆素、迷迭香、t-阿魏酸、原儿茶酸、香草酸、苯甲酸、羟基苯乙酸、同叶酸(homoveratric acid)、3-(4-羟基苯基)丙酸含量高于果肉($P<0.05$)^[12]。甘蔗汁中咖啡酸含量最高,而蔗叶和蔗渣的阿魏酸含量最高^[14]。

1.3.3 贮存加工条件 研究发现,37 $^{\circ}\text{C}$ 比4 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏时结合态酚酸含量下降迅速^[25]。郑妍^[26]研究发现加工工艺过程对猕猴桃和苹果果汁中酚类物质的含量影响较大,而对酚类物质的组成种类影响很小,果胶酶酶解果浆处理可大幅提高果汁中的酚类物质含量,而高温灭酶处理也可在一定程度上提高果汁的酚类物质含量。高温杀菌处理可造成果汁中酚类物质的损失,高温瞬时杀菌(95~100 $^{\circ}\text{C}$,30 s)对酚类物质的保留效果好于巴氏杀菌(85 $^{\circ}\text{C}$,4 min)。高压(HPP)处理后红柚汁中酚酸类物质、总酚含量下降,抗氧化能力(DPPH、FRAP)下降,高温短时杀菌(HTST)处理后红柚汁中总酚含量和抗氧化性下降更显著^[27]。与冷冻干燥(FD)处理相比,热处理导致柠檬中总酚之和、总酚酸与结合态总酚含量下降,游离态酚酸总量、生物利用总酚含量及其生物利用度上

升,热风干燥(AD)处理组酚酸为3 257.7 mg/kg,可作为工业化干制柠檬的方式^[28]。蒸制和微波处理后紫色马铃薯紫色品系的多酚和绿原酸的质量分数均升高,而水煮处理后,所有成分的质量分数均显著降低^[29]。

2 酚酸在果蔬保鲜的研究应用

2.1 水杨酸

水杨酸(SA)即邻羟基苯甲酸,是植物中普遍存在的一种小分子酚类物质,参与调节多种生理生化代谢过程,局部或系统性地调节植物的抗逆性反应。目前对水杨酸的研究较为深入,被认定为一种新型的植物激素和重要的内源性信号分子,已发现在植物抵抗严寒、高温、干旱、重金属毒性、渗透胁迫等非生物胁迫方面发挥着重要作用。SA处理采后果蔬后降低其呼吸强度,抑制乙烯的合成,增强抗氧化系统的作用及保护酶活性、提高细胞膜的完整性、促进热休克蛋白基因的激活和表达、减轻果蔬的冷害及病害发病率。在适量浓度范围下水杨酸能够延缓桃子、李子、枇杷、菠萝、石榴、哈密瓜、番茄、甜椒、竹笋等果蔬成熟衰老速度,有效地保证果蔬的卫生质量及营养品质。

高雪等^[30]采用0.5 g/L水杨酸(SA)处理结合低温保藏能抑制杨梅采后呼吸和细胞膜透性的增加,显著减缓总可溶性固形物、总酸和维生素C含量的下降,减少果实失水和腐烂,有效延缓杨梅衰老和保持果实品质。15 mmol/L浓度水杨酸处理有效延缓仔姜贮藏期间失重率、色差值、硬度、脆度、总酚、总黄酮及姜辣素含量的降低^[31]。辛松林等^[32]研究发现水杨处理可显著提高黄秋葵果实的总抗氧化能力、DPPH·清除能力、超氧阴离子自由基($O_2\cdot^-$)清除能力、羟基自由基($\cdot OH$)清除能力;显著降低细胞膜的渗透率、 H_2O_2 含量和 $O_2\cdot^-$ 含量。0.1%水杨酸处理可明显推迟哈密瓜的后熟,抑制酶的活性,延缓哈密瓜的衰老,很好地保持其优良的品质^[33]。水杨酸采前处理均能有效降低采后芒果接种炭疽菌芒果的病斑直径和未接菌芒果在贮藏期间自然发病的病情指数,提高采后芒果果实的抗病性^[34]。

除SA外,还采用其衍生物乙酰水杨酸(ASA)进行保鲜,研究发现ASA在生物体内会很快转化为SA,与SA一样,ASA均能够延缓猕猴桃、梨、香蕉和苹果果实的成熟衰老和组织软化,降低ACO活性,抑制ACC向乙烯转化。

2.2 绿原酸

绿原酸又称咖啡单宁酸、咖啡鞣酸,化学名为3-O-咖啡酰奎尼酸,由咖啡酸与奎尼酸组成的缩酚酸,是植物体在有氧呼吸过程中由肉桂酸和奎尼酸经莽草酸途径形成的一种苯丙素类物质。绿原酸在杜仲和金银花等植物中分布相当广泛,具有抗氧化、抗菌、抗癌、抗紫外光与辐射、免疫调节、降血脂、降血糖等药理作用,在食品行业中绿原酸还可应用于果蔬保鲜,还在医药保健品、日用化工行业中有着重要用途。

沈奇等^[35]研究发现从蒲公英中提取的绿原酸对葡萄具有保鲜作用。杨明阳等^[36]研究也表明绿原酸对梨、苹果鲜切片具有较好的保鲜效果。何念武等^[37-38]研究发现杜仲叶绿原酸对果蔬确有保鲜效果,能有效降低贮藏期间圣女果和黄瓜的失重率,有机酸和维生素C含量减少的趋势明显被抑

制,因此在很大程度上保持其新鲜程度。绿原酸可以显著降低油桃果实贮藏期间的乙烯释放量、呼吸速率、软化程度、腐烂率和丙二醛含量,延缓了贮藏期间油桃果实果皮颜色的转红、可滴定酸含量下降和可溶性固形物上升,显著增强了果实的抗氧化活性、自由基清除能力和还原能力^[39]。

2.3 阿魏酸

阿魏酸又称4-羟基-3-甲氧基肉桂酸,广泛存在于植物界中。植物体内的阿魏酸主要以水溶态、脂溶态和束缚态3种形式存在。水溶态下的阿魏酸与一些小分子如单糖、多胺等结合呈易溶态,其主要存在于植物的细胞质中;脂溶态的阿魏酸常结合一些脂溶性的物质存在于植物的蜡质层中;在束缚态下,阿魏酸常以醚或酯的形式与植物细胞壁物质相结合。阿魏酸作为食品抗氧化剂在食品领域中的应用非常广泛,它不仅明显提高一些蛋白类或多糖类食品的品质,而且与一些其他的物质(如 V_C)结合使用,可以大大增强食品抗氧化效果。目前,将阿魏酸用于食品抗氧化剂在日本已被批准,美国和一些欧洲国家也已经开始采用一些含阿魏酸量较高的物质(如香兰豆、草药、咖啡等)作为抗氧化剂,对食品进行防腐保鲜。高兆银等^[40]研究发现0.4 mg/mL阿魏酸对芒果采后病原菌均有一定的抑制活性。1~10 mmol/L阿魏酸处理能显著抑制绿熟期番茄青霉孢子萌发和菌落扩展;5 mmol/L阿魏酸处理降低了番茄果实的可溶性固形物含量,提高了果实的抗坏血酸和番茄红素含量,同时降低了损伤果实青霉病的发病率和病斑直径^[41]。比例为4/1阿魏酸葡萄糖酯与阿魏酸木糖酯质量份数10份、硼砂12份、去离子水1 000份、抗坏血酸3份合成的阿魏酸葡萄糖酯和阿魏酸木糖酯对离体后的红富士苹果果实有较好的抗氧保鲜效果^[42]。阿魏酸处理的芒果贮藏时间明显延长,平均贮藏时间达15.51 d,对胶孢炭疽菌 *Colletotrichum gloeosporoideum* (Penz.) Penz. And Sacc.)、尖孢炭疽菌 (*C. ucututum* Sammonds)、可可球二孢菌 (*Botryodiplodia theobromae* Pat)、拟茎点霉 (*Phomopsis mungiferue* Ahmad) 和小穴壳菌 (*Dothiorella domanacunu* Petr. & Cif.) 5种芒果采后病害病菌的毒力存在极显著差异 ($P \leq 0.01$)^[43]。

2.4 没食子酸

没食子酸又名五倍子酸、鞣酸,化学名为3,4,5-三羟基苯甲酸,具有多酚类和酸类物质的通性,是多种植物的主要活性成分,通常以游离酸或形成酯类化合物的形式广泛存在于茶葉叶、大叶按、石榴皮等植物中。作为一种有机酚酸,没食子酸具有较强的还原性,易与蛋白质、酶以及生物碱发生反应,发挥抑菌、抗氧化及抗炎等生物学作用,还具有抗肿瘤、抗突变、抗自由基等特性。没食子酸丙酯具有较高的抗氧化活性,已作为安全的食品添加剂在食品中使用,是联合国粮农组织(FAO)和世界卫生组织(WTO)批准使用的优良油脂抗氧化剂之一。我国允许使用于食品的抗氧化剂国家标准为没食子酸丙酯0.1 g/kg。

目前试验研究多采用没食子酸甲酯、没食子酸丙酯进行果蔬保鲜。丁君等^[44]采用0.20%没食子酸丙酯+1.50%壳聚糖处理延缓了鲜切生姜失重率和丙二醛含量的升高,降低鲜切生姜的褐变速率,抑制POD活性,使鲜切生姜的 V_C 含量

和硬度维持在较高水平,而其咀嚼性和弹性保持在较低水平。没食子酸丙酯对抑制芥菜丝在贮藏过程中褐变有显著影响,可有效抑制芥菜丝褐变,显著降低芥菜丝中过氧化物酶活性,在室温下贮藏 21 d 后芥菜丝仍有商品价值^[45]。5 mmol/L 没食子酸丙酯浸泡 20 min 有效降低龙眼果实呼吸强度,延缓果皮细胞膜相对渗透率升高,保持较高的果肉总糖、蔗糖、维生素 C 等营养成分含量和果皮叶绿素、类胡萝卜素、类黄酮和总酚含量,降低龙眼果皮褐变指数和果肉自溶指数,提高果实好果率^[46]。0.50 mmol/L 没食子酸丙酯处理后甜瓜果实货架期延长,果实腐烂率减少,有效保持果实储藏期间较高的含水量以及可溶性糖、可滴定酸和维生素 C 含量,明显减轻甜瓜果实的氧化损伤,有效抑制甜瓜在储藏期间 H₂O₂ 含量积累,抗氧化酶类 CAT、SOD 和 POD 活性均维持在较高水平^[47]。由没食子酸的羧基与壳聚糖分子上的氨基和羟基反应连接制备壳聚糖没食子酸衍生物提高鲜切苹果种多酚和 V_C 含量,显著降低 PPO、微生物数量^[48]。

2.5 其他酚酸 目前研究多采用酚酸复配保鲜剂或制成包装材料进行果蔬保鲜。汤晓雨^[49]采用原儿茶酸 123 mg/L、普鲁兰多糖 0.45%、CaCl₂ 1.1% 混合配制复合涂膜保鲜剂,对湘研 15 号辣椒具有较好的保鲜作用,其呼吸强度、V_C、总酚多酚氧化酶(PPO)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)显著下降,色泽、亮度、饱和度、过氧化氢酶(CAT)活性显著提高。壳聚糖-原儿茶酸接枝共聚物对副溶血性弧菌、金黄色葡萄球菌、李斯特菌、沙门氏菌的抑菌效果明显,涂膜液涂于杏鲍菇表面能保持较好的外观,表现出较高的硬度和较低的失重率、褐变程度、呼吸速率、丙二醛含量、细胞膜透性、超氧阴离子产生速率和过氧化氢含量,及相对较高的抗氧化酶活性和较低的多酚氧化酶活性^[50]。

肉桂酸作为一种天然提取物,安全无毒,目前对肉桂酸及其衍生物的研究包括了酪氨酸酶抑制剂、抑菌作用、保鲜作用。肉桂酸及其衍生物可以延缓双孢蘑菇的褐变,同时双孢蘑菇在采后易发生腐烂。肉桂酸及衍生物对 6 株细菌和 8 株真菌菌株有不同程度的抑制作用,抑制效果从强到弱依次为 4-甲基肉桂酸、4-甲氧基肉桂酸、肉桂酸、4-羟基肉桂酸^[51]。

壳聚糖咖啡酸衍生物可溶于水,具有抑菌、杀菌等生物活性,减缓桑椹鲜果的可溶性固形物、维生素 C 和花青素含量及含水率的降低速度,并在一定程度提高多酚和总黄酮的含量,用于桑椹鲜果的保鲜可以较好地保护桑椹的营养保健品质^[52]。对羟基苯甲酸处理对采后柑橘炭疽病原菌有较强的抗菌作用,EC₅₀ 为 0.056 mg/mL, PPO、POD、SOD、PAL 活性升高,MDA 含量下降,提高柑橘果实相关抗性酶活性以及抑制膜脂过氧化反应,诱导其果实抗性^[53]。2.5% 对羟基苯甲酸丙酯的防霉聚乙烯膜断裂伸长率降低 49.86%,防霉效果在添加 1.5% 时达到 QB/T 2591—2003 标准的 1 级水平,有效保持油菜品质,减缓包装袋内气体含量变化,减少油菜黄化率、失重率、色差、细胞膜透性的变化^[54]。5 g/L 对羟基苯甲酸乙酯联合 15 g/L 丙酸钙以及 5 g/L 茶多酚的聚乙

烯醇薄膜对鲜切山药室温保鲜的效果最好^[55]。

3 结语与展望

了解酚酸在果蔬原料中的具体分布对其在果蔬贮藏加工的营养调控具有重要指导意义。作为植物体内次生代谢产物,酚酸与木质素和酚类色素的合成、细胞发育、组织褐变及抵抗外界病原微生物侵染等都有着密切的联系,但受物种、品种、部位、成熟期、贮藏加工条件等因素的影响,不同果蔬内源酚酸的形态、种类和含量存在很大差异,因此对果蔬营养品质、贮藏加工有一定的影响。

外源酚酸如绿原酸、水杨酸、阿魏酸、没食子酸及其衍生物作为抗氧化剂、杀菌剂应用于果蔬保鲜已取得部分成效,在实践生产中具有良好前景。今后果蔬酚酸物质研究可从以下方面着手:①深入研究不同物种、不同品种、不同成熟期、不同季节果蔬的内源酚酸形态、种类和含量的转化机制;②通过外源环境条件变化调控果蔬内源酚酸,探索其与色素、硬度、多糖、植物激素等品质的关联性,延长果蔬货架期;③研究酚酸物质在果蔬加工过程中的变化规律及其与加工品质品质的关系,提高果蔬加工营养品质。

参考文献

- [1] GUNENCE A, ROWLAND O, XU H G, et al. Portulaca oleracea seeds as a novel source of alkylresorcinols and its phenolic profiles during germination [J]. Food science and technology, 2019, 101: 246-250.
- [2] 赵东平, 郭玉海. 不同酚酸处理对管花肉苁蓉种子发芽的影响[J]. 北方园艺, 2011(12): 159-160.
- [3] GAWLIK-DZIKI U, DZIKI D, NOWAK R, et al. Influence of sprouting and elicitation on phenolic acids profile and antioxidant activity of wheat seedlings [J]. Journal of cereal science, 2016, 70: 221-228.
- [4] PAJAK P, SOCHA R, GAŁKOWSKA D, et al. Phenolic profile and antioxidant activity in selected seeds and sprouts [J]. Food chemistry, 2014, 143(15): 300-306.
- [5] HORBOWICZ M, MIODUSZEWSKA H, KOCZKODAI D, et al. The effect of methyl jasmonate and phenolic acids on growth of seedlings and accumulation of anthocyanins in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* (Moench) [J]. Acta grobotanica, 2009, 62(1): 49-56.
- [6] LAGAERT S, BELLIEN T, VOLCKAERT G. Plant cell walls: Protecting the barrier from degradation by microbial enzymes [J]. Seminars in cell & developmental biology, 2009, 20(9): 1064-1073.
- [7] ZHANG L Q, LI Y, LIANG Y, et al. Determination of phenolic acid profiles by HPLC-MS in vegetables commonly consumed in China [J]. Food chemistry, 2019, 276: 538-546.
- [8] ROBBINS R J. Phenolic acids in foods: An overview of analytical methodology [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2003, 51(10): 2866-2887.
- [9] 张宇环. 杨梅汁中酚类物质及抗氧化性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [10] 杨延峰. 南丰蜜桔产地溯源及其幼果的功能性成分的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [11] 王毕妮. 红枣多酚的种类及抗氧化活性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [12] LEE J, CHAN B L S, MITCHELL A E. Identification/quantification of free and bound phenolic acids in peel and pulp of apples (*Malus domestica*) using high resolution mass spectrometry (HRMS) [J]. Food chemistry, 2017, 215: 301-310.
- [13] MATTILA P, KUMPULAINEN J. Determination of free and total phenolic acids in plant-derived foods by HPLC with diode-array detection [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2002, 50(13): 3660-3667.
- [14] 扶雄, 周惠芳, 李超, 等. 甘蔗不同组织中游离态和结合态酚酸的分布及抗氧化活性[J]. 现代食品科技, 2014, 30(11): 17-22.
- [15] 林媚, 平新亮, 徐程楠, 等. 温州蜜柑和美人果果实中类黄酮及酚酸特征研究[J]. 农产品质量与安全, 2018(6): 43-48.
- [16] ALU'DATT M H, RABABAH T, ALHAMAD M N, et al. Profiles of free and bound phenolics extracted from Citrus fruits and their roles in biolog-

- ical systems; Content, and antioxidant, anti-diabetic and antihypertensive properties[J]. Food and function, 2017, 8(9): 3187-3197.
- [17] DONG X Y, HU Y, LI Y, et al. The maturity degree, phenolic compounds and antioxidant activity of Eureka lemon [*Citrus limon* (L.) Burm. f.]: A negative correlation between total phenolic content, antioxidant capacity and soluble solid content[J]. Scientia horticulturae, 2019, 243: 281-289.
- [18] BOGUCA-KOCKA A, ZIDORN C, KASPRZYCKA M, et al. Phenolic acid content, antioxidant and cytotoxic activities of four *Kalanchoe* species[J]. Saudi journal of biological sciences, 2018, 25(4): 622-630.
- [19] LAVOLA A, MAUKONEN M, JULKUNEN-TIITTO R. Variability in the composition of phenolic compounds in winter-dormant *Salix pyrolifolia* in relation to plant part and age[J]. Phytochemistry, 2018, 153: 102-110.
- [20] DING C, LIU Q, LI P, et al. Distribution and quantitative analysis of phenolic compounds in fractions of *Japanica* and *Indica* rice[J]. Food chemistry, 2019, 274: 384-391.
- [21] SØLTOFT M, NIELSEN J, LAUREN K H, et al. Effects of organic and conventional growth systems on the content of flavonoids in onions and phenolic acids in carrots and potatoes[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2010, 58(19): 10323-10329.
- [22] DE PAULA R, RABALSKI I, MESSIA M C, et al. Effect of processing on phenolic acids composition and radical scavenging capacity of barley pasta[J]. Food research international, 2017, 102: 136-143.
- [23] 高伟, 刘剑波, 朱明扬, 等. 4种柠檬不同组织的酚类物质分布及其抗氧化特性[J]. 中国食品学报, 2019, 19(2): 281-290.
- [24] 霍莉, 锁然, 李宁, 等. 苦菜不同部位营养成分及其生理活性测定[J]. 食品工业科技, 2016, 37(1): 356-359.
- [25] ZHOU Z K, ROBARDS K, HELIWEILL S, et al. The distribution of phenolic acids in rice[J]. Food chemistry, 2004, 87(3): 401-406.
- [26] 郑妍. 几种果汁中酚类物质的 UPLC 分析及其指纹图谱构建[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [27] 高歌. 超高压技术在红柚汁加工与柚皮果胶提取中应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [28] 高伟. 干燥方式对柠檬中酚类物质及其品质的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- [29] 王耀红. 彩色马铃薯种质资源遗传多样性及多酚类物质的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [30] 高雪, 陈荣紫. 水杨酸(SA)处理结合低温保鲜杨梅的研究[J]. 北方园艺, 2018(6): 102-105.
- [31] 付云云, 蒋成, 闫小倩, 等. 水杨酸处理对仔姜保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 157-162.
- [32] 辛松林, 秦文, 李慧妍, 等. 不同保鲜方法对黄秋葵果实贮藏品质及活性氧代谢的影响[J]. 北方园艺, 2017(23): 164-169.
- [33] 沈艾彬, 刘峰娟, 秦宗权, 等. 不同酸处理对哈密瓜采后生理的影响[J]. 食品工业, 2011, 32(4): 65-67.
- [34] 弓德强, 黄训才, 黄光平, 等. 采前水杨酸处理对‘红芒6号’芒果采后抗病性的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(5): 111-115.
- [35] 沈奇, 金春雁, 张卫明, 等. 蒲公英绿原酸及其包合物对葡萄保鲜作用的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(6): 332-335.
- [36] 杨明阳, 王光兰, 刘伦沛. 金银花中绿原酸提取及其在果蔬保鲜中的应用[J]. 凯里学院学报, 2013, 36(6): 66-73.
- [37] 何念武, 杨超. 杜仲叶中绿原酸的提取及其在果蔬保鲜中的应用[J]. 江西农业学报, 2015, 27(7): 107-110.
- [38] 何念武, 杨超. 杜仲叶绿原酸对果蔬保鲜作用的试验研究[J]. 江西农业学报, 2018, 30(11): 71-75.
- [39] 奚宇. 绿原酸对油桃和苹果果实采后成熟衰老的调控作用[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [40] 高兆银, 胡美姣, 李敏, 等. 植物萃取物对芒果的保鲜效果[J]. 浙江农业科学, 2011(1): 96-97, 126.
- [41] 胡斌, 潘洁, 陈丽, 等. 阿魏酸处理对番茄采后果实品质和青霉病害的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(1): 14-18, 24.
- [42] 李东明. 新型果蔬抗氧保鲜剂的研制[D]. 天津: 天津工业大学, 2006.
- [43] 张正科, 高兆银, 李敏, 等. 食品添加剂对芒果采后病原菌及保鲜效果的影响[J]. 热带作物学报, 2013, 34(11): 2289-2294.
- [44] 丁君, 吴昊, 王成荣. 没食子酸丙酯、壳聚糖对鲜切生姜保鲜特性的影响[J]. 中国调味品, 2016, 41(3): 41-44, 63.
- [45] 倪伟, 丁占生. 没食子酸丙酯在对芥菜色泽劣变的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(3): 107-110.
- [46] 林芝芬, 林河通, 陈艺晖, 等. 柠檬丙酯处理对采后龙眼果实的保鲜效应[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 157-162.
- [47] 曹中权, 余璐璐, 徐飞. 没食子酸丙酯处理对薄皮甜瓜采后储藏保鲜的影响[J]. 北方园艺, 2016(5): 148-152.
- [48] 吴昊, 朱俊向, 王成荣, 等. 壳聚糖没食子酸衍生物制备及其对鲜切苹果的保鲜作用[J]. 现代食品科技, 2014, 30(5): 251-257.
- [49] 汤晓雨. 原儿茶酸与普鲁兰多糖复合涂膜保鲜剂对辣椒采后保鲜研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- [50] 孟晨光. 壳聚糖-原儿茶酸接枝共聚物的合成及其对杏鲍菇的保鲜效果[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [51] 柯莉娜, 胡泳华, 高焕娟, 等. 肉桂酸及其衍生物对双孢蘑菇致腐微生物的体外抑菌效果比较[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(3): 330-335.
- [52] 杨采风, 李长龙, 周雨, 等. 桑椹鲜果经壳聚糖咖啡酸衍生物保鲜处理后的主要活性成分检测[J]. 蚕业科学, 2016, 42(1): 124-130.
- [53] 黄小兰, 盖智星, 王日葵, 等. 对羟基苯甲酸处理对采后柑橘炭疽病的抑制及机理研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 121-125, 208.
- [54] 罗金山, 杜林雪, 李喜宏, 等. 对羟基苯甲酸丙酯防腐聚乙烯膜对油菜保鲜效果研究[J]. 食品科技, 2013, 38(12): 30-33.
- [55] 蒋硕. 改性抗菌聚乙烯醇薄膜的性能及其对冷藏鳊鱼和鲜切山药贮藏期间品质影响的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.

(上接第 21 页)

- [10] 周悦, 刘博, 龙春林. 中国植物种质资源在草原生态系统修复中的作用[J]. 中国草地学报, 2016, 38(1): 111-115.
- [11] 张璐, 莱新山, 吴智仁, 等. 一种亲水反应型聚氨酯在高寒草原生态修复中的应用研究[J]. 材料导报, 2018, 32(S2): 251-253, 256.
- [12] 赵燕洲, 薛春晓, 杨印海. 青藏铁路路域高寒草原生态修复技术研究[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(7): 90-94.
- [13] 王明玖, 邢旗, 王君芳, 等. 草地生态修复工程与发展趋势[C]//中国畜牧业协会草业分会. 第四届中国草业大会论文集. 北京: 中国畜牧业协会, 2016: 9.
- [14] 何京丽. 北方典型草原水土保持生态修复技术[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 299-301.
- [15] 付慧, 白中科, 张树礼, 等. 呼伦贝尔草原矿生态受损预测与修复对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 90-94.
- [16] 李旭. 大庆草原生态保护与开发研究[J]. 大庆社会科学, 2018(4): 71-73.
- [17] 樊俊梅, 邢旗, 纪大才, 等. 生态大数据在草原生态修复中的应用[J]. 草原与草业, 2017, 29(4): 1-6.
- [18] 陈广宏. 宁夏封山禁牧生态修复的实践与思考[J]. 中国水土保持, 2007(5): 12-14.
- [19] 王召明. 草原区域荒漠化防治与产业融合发展的探索[J]. 草原与草业, 2017, 29(1): 1-5.
- [20] 罗刚. 呼伦贝尔沙地生态修复现状、问题及对策[J]. 林业建设, 2015(4): 108-112.
- [21] 田晓明. 呼伦贝尔草原生态存在的问题及其治理对策[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2016.
- [22] 赖俊华, 张凯, 王维树, 等. 化学固沙材料研究进展及展望[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 644-658.
- [23] 闫德仁. 内蒙古防沙治沙技术与模式简述[J]. 内蒙古林业, 2018(10): 14-16.
- [24] 孟琳, 赵雨森. 生物固沙对土壤植被的影响[J]. 防护林科技, 2005(6): 38-41.
- [25] 朱虹, 祖元刚, 王文杰, 等. 盐碱地的植被恢复与盐碱地改良方法的评述[J]. 吉林林业科技, 2007(5): 14-21, 27.
- [26] 韩微波, 申忠宝, 唐凤兰, 等. 我国利用耐盐牧草恢复盐渍化草地的研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2013(9): 32-35.
- [27] 李胜军, 朝鲁孟其其格, 等. “生物笆”技术恢复草原矿区植被的方法与效果[J]. 内蒙古草业, 2011, 23(4): 19-21.
- [28] 成格尔, 王明玖, 崔向新, 等. 呼伦贝尔草原神宝公司露天煤矿排土场植被重建成效调查[J]. 草原与草业, 2016, 28(2): 15-18.
- [29] 苟文龙, 张新跃, 李元华. 四川汶川大地震灾区草原生态破坏与修复关键技术[J]. 亚热带水土保持, 2010, 22(1): 82-85.
- [30] 张新跃, 李元华, 苟文龙. 5·12汶川大地震灾区草原生态修复与种草养畜恢复生产技术指南(一)[J]. 四川畜牧兽医, 2009, 36(11): 33-34.